

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НОВІКОВ Валерій Іванович

УДК 621.396.1

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ  
МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ  
ВИКОРИСТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України  
ЛИСЕНКО Олександр Іванович,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
ХЛАПОНІН Юрій Іванович,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури,  
завідувач кафедри кібербезпеки та  
комп'ютерної інженерії

доктор технічних наук, професор  
ТРЕМБОВЕЦЬКИЙ Максим Петрович,  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри інженерії програмного  
забезпечення

Захист відбудеться «22» березня 2021р. о 15<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 255.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «        » лютого 2021р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



Л.О. Уривський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надзвичайні ситуації природного і техногенного характеру, військові конфлікти, які все частіше трапляються у нашому світі, призводять до часткового або повного виходу з ладу наземної інфраструктури, у тому числі інфраструктури телекомунікацій (радіорелейних та супутникових станцій, базових станцій стільникового зв'язку, кабельних ліній та ін.). Оперативне забезпечення зв'язку підрозділів рятувальних бригад і інших служб у таких ситуаціях можливе шляхом розгортання мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ (ТАП). Мобільні сенсорні вузли (МСВ), що входять до складу МБСМ, можуть вільно пересуватись в заданому районі та з'єднуватись між собою безпосередньо – у зоні радіовидимості, або із ретрансляцією пакетів через сусідні МСВ (ТАП), утворюючи багатоланкові мережі довільної структури. Збільшення зони покриття МБСМ із ТАП можливо шляхом ієрархічної просторової організації МБСМ із ТАП із застосуванням ТАП різних рівнів, що виконують роль ретрансляторів, поєднуючи між собою віддалені МСВ. Особливо актуальним є застосування ТАП на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які більш економічні та оперативні на відміну від великих ТАП.

Топологія МБСМ із ТАП носить динамічний характер, постійно змінюється, а отже потребує ефективної системи управління (СУ), здатної швидко реагувати на структурні та функціональні зміни для забезпечення тих чи інших цілей управління. Цілями управління може бути забезпечення структурної зв'язності, забезпечення якості маршрутів передачі повідомлень між МСВ, підвищення пропускної здатності (ПЗ) МБСМ із ТАП та ін. Управляючими параметрами у даному випадку можуть виступати взаємне положення МСВ (ТАП), потужність передавачів мережеских вузлів, спрямованість наземних і бортових антен, навантаження та ін. На сьогодні недостатньо розв'язаною є задача оптимального оперативного розміщення ТАП для підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності МСВ. Запропоновані на сьогодні методи управління топологією (місцеположенням) ТАП, вирішують лише часткові задачі забезпечення структурної зв'язності роз'єднаних компонентів МБСМ із ТАП і не враховують обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження і обслуговування пакетів в вузлах мережі. Більшість методів також вирішують лише статичні задачі, не враховують мобільність МСВ, маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню. Існуючі методи планування наземних безпроводних сенсорних мереж (БСМ) також не ефективні, оскільки вони мають велику складність і час обчислення, що не дозволяє ТАП в режимі реального часу відпрацьовувати отримані рішення.

Отже виникає **актуальна наукова задача** розробки методу підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого і непередбачуваного переміщення мобільних сенсорних вузлів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем навчально-наукового

інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського за тематикою держбюджетних науково-дослідних робіт № держреєстрації 0115U000269 «Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища» і № держреєстрації 0117U004282 «Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності МСВ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ.

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі ставилися і вирішувалися наступні взаємозалежні завдання дослідження:

1. Проаналізувати принципи функціонування і методи підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП.

2. Удосконалити математичну модель оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП, що дозволить визначати не тільки наявність зв'язності між ними, а й прогнозувати її тривалість у випадку швидкої та непередбачуваної зміни положення МСВ.

3. Дослідити математичні моделі оцінки показників функціонування МБСМ із ТАП, а саме середню затримку передачі та пропускну здатність між заданою парою відправник-отримувач.

4. Удосконалити алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП, що дозволить в процесі поточного функціонування МБСМ із ТАП знаходити раціональні рішення задачі управління положенням ТАП при зміні умов функціонування мережі (відмови МСВ, ТАП, зовнішні збурення, непередбачувані переміщення МСВ).

5. Розробити метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП із управлінням положенням ТАП, що дозволить систематизувати існуючі і запропоновані моделі та алгоритми.

6. Провести оцінку ефективності запропонованого методу.

**Об'єкт досліджень** – процес функціонування мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами.

**Предмет досліджень** – методи підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ.

**Методи дослідження.** Для вирішення наукової задачі в дисертаційній роботі були використані методи теорії графів (для розробки математичної задачі дослідження), теорії телекомунікаційних мереж (для розрахунку інтенсивності трафіку в радіоканалах МБСМ із ТАП), математичного моделювання (для розробки математичних моделей переміщення МСВ), теорії масового обслуговування (для дослідження аналітичних моделей показників функціонування МБСМ із ТАП) та теорії оптимізації (для розробки алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП).

**Наукова новизна отриманих результатів.** Нові наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, наступні:

1. Вперше розроблено метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП з управлінням положенням ТАП.

Відмінність розробленого методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП від відомих, що визначає його новизну, полягає в тому, що математичні моделі оцінки структурно-функціональної зв'язності МСВ та удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП вперше були об'єднані в єдину обчислювальну процедуру, що дозволяє досягати значень пропускної здатності МБСМ із ТАП близьких до екстремальних в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ. Застосування методу дозволяє отримати вираш у пропускній здатності МБСМ із ТАП на 10-12% у порівнянні із відомими методами.

2. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП.

Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП, що визначає її новизну, полягає в тому, що вперше були об'єднані аналітичні моделі оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах мережі із сукупністю аналітичних моделей прогнозування переміщення МСВ. Це дозволило не тільки оцінювати наявність зв'язності з заданою достовірністю, а й прогнозувати її тривалість у випадку швидкої та непередбачуваної зміни положення МСВ. Отримані аналітичні моделі прогнозування переміщення МСВ дозволяють здійснювати імітаційне моделювання середнього часу їх перебування в зоні радіо покриття ТАП та визначати необхідну частоту зміни положення ТАП у просторі.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП.

Суть удосконалення алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, що визначає його новизну, полягає в тому, що в ньому вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення ТАП завдяки використанню попередньо розробленим правилам відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищує її пропускну здатність, а також зменшує час обчислень, що дозволяє отримати в режимі реального часу рішення, що близькі до оптимальних і використовувати алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Відхилення квазіоптимальних рішень від оптимальних, які були отримані методом повного перебору, не перевищує 5-7%.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в тому, що розроблені математичні моделі, алгоритми і метод дозволяють:

- 1) кількісно оцінювати вплив мобільності вузлів МБСМ із ТАП на тривалість зв'язності між МСВ;
- 2) визначати раціональне положення ТАП для досягнення якомога більших значень пропускної здатності МБСМ із ТАП;
- 3) здійснювати в режимі реального часу управління положенням ТАП;
- 4) підвищувати ефективність систем управління мережею ТАП.

### **Особистий внесок здобувача.**

Усі основні наукові результати дисертаційної роботи, винесені на захист, отримані автором самостійно. Особистий внесок дисертанта в публікаціях, виконаних у співавторстві, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації наступний: в [1] – удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП; в [2] – здійснено математичне моделювання руху вузла цілі (мінідрону) по колу, на стенді напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи; в [3] – розроблено метод підвищення пропускну здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами; в [6] – запропоновано нову функціональну модель системи оперативного управління неоднорідними мобільними безпроводовими сенсорними мережами; в [7] – запропоновано удосконалену функціональну модель системи управління безпроводовою сенсорною мережі із самоорганізацією.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні положення та результати роботи доповідалися на наступних науково-технічних і науково-практичних конференціях та семінарах: International Scientific Conference COMPLEX SYSTEMS SECURITY MANAGEMENT 2015 (Словачія, м. Ліптовський Мікулаш, Академія Збройних Сил генерала М.Р. Штефаніка, 23 – 27 лютого 2015 р.), 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Україна, м. Київ, НАУ, 13-15 жовтня 2015р.), 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016) (Україна, м. Київ, НАУ, 18-20 жовтня 2016р.), VII, IX, X, XI, XII, Міжнародні науково-технічні конференції «"Проблеми телекомунікацій"» (Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 16-19 квітня 2013р., 21-24 квітня 2015 р., 19-22 квітня 2016 р., 16-20 квітня 2017 р., 18-21 квітня 2018 р.); XIII, XIV Міжнародні науково-технічні конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» (Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 15-19 квітня 2019 р., 13-17 квітня 2020 р.); XII, XIII міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми інформатизації» (Україна, м. Київ, ДУТ, 12 – 13 грудня 2018 р., 11-12 квітня 2019р.); I міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій» (Україна, м. Київ, НУХТ, 7–8 лютого 2019 р.); Науково-практичний семінар «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (Україна, м. Харків, Національний університет цивільного захисту України, 21 лютого 2019 р.)

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 35 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 10 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, яке включено до міжнародних наукометричних баз), 3 патенти на винахід, 2 патенти на корисну модель, 1 свідоцтво авторського права, 18 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

### **Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 143

У **вступі** обґрунтовується актуальність проведених у дисертаційній роботі досліджень, сформульовані наукова задача та мета досліджень, визначені основні напрямки вирішення поставленої наукової задачі, вказано на зв'язок з науковими програмами, планами та темами. Також сформульовані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів та наведені відомості про апробацію, публікації та реалізацію основних наукових результатів, отриманих у роботі.

ЦУ

$(x_i, y_i), v_i, P_i$

ТАП 2

Мережа ТАП

$X_{0k}$

$f_5$

$f_6$

ТАП 1

$f_4$

ТАП 3

$f_2$

$f_3$

Мобільна БСМ

h

MCB

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

$(x_0, y_0)$

R

r

Канал передачі даних МБСМ із ТАП

Службовий канал МБСМ із ТАП

1-й рівень МБСМ із ТАП складає мережа МСВ, які довільним чином можуть переміщуватися в деякому районі г. Для зв'язку між собою МСВ використовують спільний широкомовний радіоканал на частоті  $f_l$  при наявності прямої видимості, а при її відсутності передача повідомлень здійснюється через проміжні вузли. МСВ - це багатофункціональні пристрої, що поєднують у собі приймально-передавач, модем, кодек, маршрутизатор та запам'ятовуючий пристрій, та працюють в одночастотному напівдуплексному режимі за принципом з проміжним зберіганням

«store-and-forward». Для передачі повідомлень через ТАП кожен МСВ має також другий комплект обладнання, що працює у дуплексному двохчастотному режимі з частотами  $f_2$ - $f_3$ .

2-й рівень МБСМ із ТАП складає мережа ТАП, що баражують по колу мінімального радіусу на висоті  $h$  навколо проєкцій точок свого оптимального розміщення  $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$ , де  $K$  – кількість ТАП в мережі, утворюючи стільники радіусом  $R$ . Бортова апаратура ТАП представляє собою також складний багатофункціональний пристрій з окремими радіоінтерфейсами (для зв'язку з МСВ та ТАП між собою), здатний ретранслювати повідомлення в середині або за межі стільника. З'єднання між стільниками (ТАП-ТАП) працюють у дуплексному режимі із частотним ущільненням, з використанням набору несучих частот, що розподілені за стільниковим принципом, з окремим демодулятором на кожній частоті. За допомогою єдиного передавача пакети направляються сусіднім ТАП згідно з наявними запитами в режимі розділення в часі. При цьому вважається, що на борту кожної ТАП присутня інформація про його координати і розподіл частот по стільникам, що при зміні положення ТАП в просторі дозволяє визначити, яку з частот слід використовувати в даний момент.

В МБСМ із ТАП можливі наступні варіанти маршрутів передачі повідомлень між МСВ (наприклад, між  $МСВ_1$  та  $МСВ_{10}$ ): 1) через мережу МСВ ( $МСВ_1$ – $МСВ_2$ –...– $МСВ_{10}$ ); 2) через мережу ТАП ( $МСВ_1$ – $ТАП_1$ – $ТАП_3$ – $МСВ_{10}$ ); 3) змішаним шляхом ( $МСВ_1$ – $ТАП_1$ – $МС_6$ – $МС_7$ ...– $МС_{10}$ ). Вибір маршруту передачі повідомлень здійснюється за допомогою одного з відомих методів маршрутизації, що дозволяє кожному МСВ будувати власну таблицю маршрутизації до усіх МСВ мережі  $\Pi_i, i = \overline{1, N}$ , де  $N$  – кількість МСВ в МБСМ із ТАП.

Для управління топологією (місцеположенням) ТАП в мережі використовується центр управління (ЦУ), розташований за межами району дислокації МСВ  $r$ . Використовуючи окремий службовий канал, ЦУ через мережу ТАП збирає вихідні дані про початкову топологію МБСМ в деякий момент часу  $t$  (координати, швидкість переміщення кожного МСВ  $(x_i, y_i)_t, \vec{v}_i, i = \overline{1, N}$  та попередньо виведених ТАП  $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}], \vec{V}_{0k}, k = \overline{1, K}$  і дані про існуючі маршрути та їх якість  $\Pi_i$ ), та здійснює відповідне управлінське рішення (вивід нової ТАП або переміщення однієї з раніше виведених ТАП в нове положення в просторі  $X_{0k}$ ), при якому максимізується пропускна здатність мережі  $S$ . Також вважається, що на етапі планування мережі ЦУ відома інформація про розподіл трафіку (навантаження)  $\gamma_{ab}$  між кожною парою відправник-отримувач  $a$ - $b$ , яка задається матрицею тяжіння  $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ .

Ціллю управління положенням ТАП є підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП із одночасним забезпеченням структурної зв'язності МСВ і якості маршрутів передачі повідомлень між ними. При цьому під *пропускною здатністю* будемо розуміти максимальне значення трафіку  $\gamma$ , яке МБСМ із ТАП може обробити в одиницю часу при незмінній матриці тяжіння  $\Gamma$ .



Тоді загальну постановку задачі можна сформулювати наступним чином: визначити таке розміщення  $X$  групи ТАП, що забезпечує максимізацію пропускну здатності мережі  $S$ , тобто  $S = f(X) \rightarrow \max_{X \in \Omega}$ , де  $\Omega$  – область допустимих значень,

що визначається вимогами до зв'язності і до показників функціонування МБСМ із ТАП;  $X = [X_{01}, \dots, X_{0K}]$ , де  $X_{01} = [x_{01}, y_{01}, z_{01}], \dots, X_{0K} = [x_{0K}, y_{0K}, z_{0K}]$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

**Другий розділ** присвячено удосконаленню математичної моделі оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП полягає в поєднанні аналітичних моделей для оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах з аналітичними моделями переміщення МСВ.

Для оцінки структурної зв'язності вузлів МБСМ із ТАП використовуються наступні вихідні дані та параметри:  $(x_i, y_i)_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $X_{0k}$ ,  $k = \overline{1, K}$  – координати МСВ і ТАП, виведених к моменту часу  $t$ ;  $h_{\max} = 3000$  м – максимальна висота баражування ТАП;  $r_{\min} = 50$  м – мінімальний радіус баражування ТАП;  $v_i = 2$  м/с – середня швидкість руху МСВ - пішохід;  $v_i = 15$  м/с – середня швидкість руху МСВ – транспортний засіб; діапазон частот радіоканалів МСВ-МСВ (МСВ-ТАП) – 2,4 ГГц, радіоканалів ТАП-ТАП – 5 ГГц; ширина смуги кожного радіоканалу  $\Delta f = 20$  МГц; модель радіоканалу МСВ-МСВ – Релея із незалежними завмираннями, усіх інших радіоканалів – із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ); потужність передавача однакова для всіх МСВ –  $p_i = \text{const}$ ; потужність передавача ТАП однакова для всіх ТАП –  $p_k = \text{const}$ ; потужність шуму на вході приймача однакова для всіх вузлів  $P_{ui} = P_{uk} = 10^{-10}$  Вт; швидкість передачі однакова для всіх каналів  $V = 11$  Мбіт/с; довжина пакету  $L = 1024$  біт.

**Обмеження** при оцінці зв'язності вузлів, що входять до складу маршрутів  $M = \{m_{ab}\}$  МБСМ із ТАП, безпосередньо між собою, наступні:  $\Omega_1: \{ d_{ij} \leq d^o, D_{ik} \leq D^o (R_{ik} \leq R^o), D_{kl} \leq D', T_{36\ ij} \geq T_{36}^0 \quad \forall ij \parallel ik \parallel kl \in m_{ab}, i, j = \overline{1, N}, k, l = \overline{1, K} \}$ , де  $d_{ij}$  – відстань між  $i$ -м та  $j$ -м МСВ,  $d^o$  – відповідне обмеження зверху, а  $D_{ik}, D^o$  – похила дальність між  $i$ -м МСВ та  $k$ -тою ТАП та відповідне обмеження зверху;  $R_{ik}, R^o$  – відстань між  $i$ -м МСВ та точкою проєкції положення  $k$ -тої ТАП на земній поверхні та відповідно максимальний радіус стабільного покриття (стільника), утворюваного  $k$ -тою ТАП;  $D_{kl}, D'$  – дальність між  $k$ -тою та  $l$ -тою ТАП;  $T_{36\ ij}, T_{36}^0$  – тривалість зв'язності між сусідніми вузлами та відповідне обмеження.  $T_{36\ ij}^0$  представляє собою мінімальний час протягом якого ТАП відпрацьовує задане розміщення, будує маршрути та здійснює передачу мінімальної кількості повідомлень.

Показано, що максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку між парою вузлів мережі обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії, при якій відношення сигнал-шум в точці прийому не менше заданої величини для забезпечення заданої

ймовірності пакетної помилки (PER) при заданому виді сигнально-кодової конструкції (СКК).

По-друге, максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку між парою вузлів мережі визначається ефективністю методу множинного доступу (МД) до загального каналного ресурсу. Якщо протяжність радіолінії збільшується, то кількість колізій при організації МД зростає, а отже зростає затримка передачі та зменшується пропускна здатність. Тому максимальну дальність радіозв'язку можна визначити граничним значенням пропускної здатності каналу  $s^0$  при заданих розмірі пакету даних  $L$ , інтенсивності трафіку  $G$  та швидкості передачі  $V$ . Так при  $s^0=0,5$  максимальна протяжність радіолінії МСВ-МСВ  $d^0$  має бути не більше 600м для методу МД із сигналом «зайнято» (МДСЗ), максимальна протяжність радіолінії МСВ-ТАП  $D^0$  – не більше 3000м для адаптивного методу МД із резервуванням (АПР)  $n$  пакетів. На довжину радіолінії ТАП-ТАП обмежень не має (окрім енергетики), оскільки метод МД, що використовується на ній, не залежить від нормованого часу поширення пакету.

Таким чином, для забезпечення заданих вимог до характеристик методів МД, потужність передавача слід обирати так, щоб забезпечити необхідний рівень PER на відстані, що визначається максимальним часом поширення пакету в стільниках МБСМ із ТАП. Наприклад, для забезпечення рівня PER  $10^{-3}$  на лінії МСВ-МСВ довжиною 600 м потужність передавача повинна бути близько 0,8 Вт. Для забезпечення того ж рівня PER на лінії МСВ-ТАП довжиною 3000 м потужність передавача повинна бути близько 4 Вт.

Знаючи максимальну похилу дальність радіолінії МСВ-ТАП та допустимий кут місця для точці розміщення МСВ, можна визначити максимальний радіус стільника, створюваного ТАП. Так при куті місця  $60^0-90^0$  та при висоті ТАП  $2600 \leq h < 3000$  м в щільно забудованому місті він становить  $R \leq 1500$  м. Але враховуючи маневрування ТАП по колу з мінімальним радіусом та неточність його виводу, максимальний радіус зони стабільного покриття становитиме  $R \leq 1450$  м.

Через свою мобільність МСВ не можуть постійно знаходитись в зоні радіо видимості інших МСВ і в зоні покриття ТАП, отже виникає практичний інтерес розрахунку тривалості зв'язності між МСВ, протягом якого вони можуть здійснювати інформаційний обмін. Для дослідження тривалості зв'язності між МСВ в роботі запропоновано декілька математичних моделей переміщення МСВ в умовах прямої радіо видимості та з урахуванням ретрансляції. Визначимо *тривалість зв'язності*  $T_{зв\ ij}$  пари вузлів (МСВ-МСВ або МСВ-ТАП) як час досягнення одним МСВ границі зони прямої радіо видимості з іншим МСВ (наприклад, час досягнення МСВ із точки  $B$  границі кола з центром в точці  $A$  та радіусом  $R$ , як показано на рис. 3). За допомогою математичного апарату тригонометрії матимемо наступне значення  $T_{зв}$ :

$$T_{зв} = \frac{AB \cos \varphi + \sqrt{R^2 - AB^2 \sin^2 \varphi}}{v},$$

де  $v$  – швидкість переміщення МСВ  $B$ , м/с;  $\varphi$  – кут напрямку переміщення МСВ  $B$ .

Таким чином тривалість зв'язності прямо пропорційна радіусу зони покриття та обернено пропорційна швидкості переміщення МСВ. На величину тривалості

зв'язності також впливає характер мобільності МСВ. Було виконано моделювання переміщення МСВ за 4-ма сценаріями, що, описують, наприклад, рух пошукової бригади під час рятувальної операції (рис. 3): 1) «марш» ( $\varphi = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ); 2) «випадкові напрямки» ( $\varphi = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ); 3) «випадкове блукання в полі» ( $\varphi = \text{random}$ ,  $v = \text{const}$ ,  $l = \text{const}$ ); 4) «випадкове блукання в місті» ( $l = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ,  $\varphi = \text{random}\{0^0, 90^0, 180^0, 270^0\}$ ).

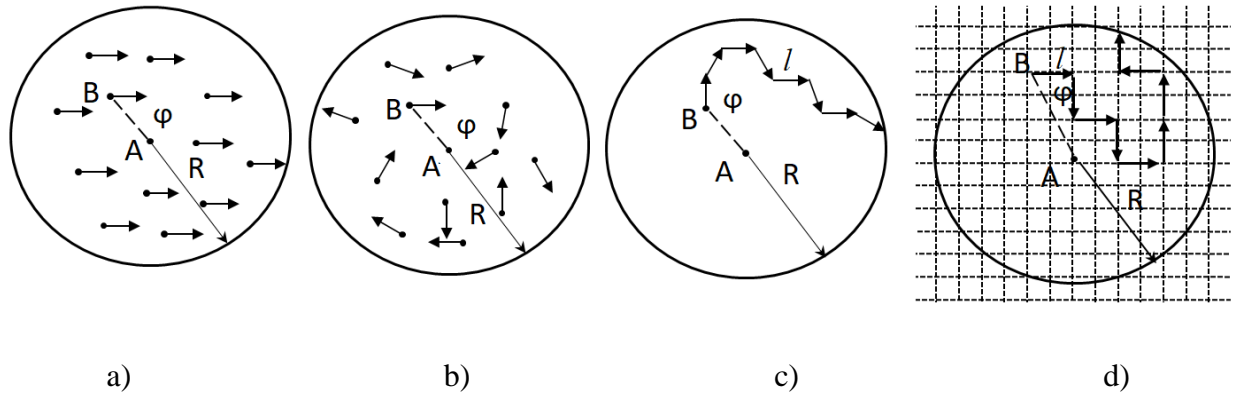


Рисунок 3. Траєкторії руху вузлів МБСМ із ТАП в залежності від сценарію мобільності: 1 – «марш» (а), 2 – «випадкові напрямки» (б), 3 – «випадкове блукання в полі» (с), 4 – «випадкове блукання в місті» (д)

Результати моделювання приведені на рис. 4.

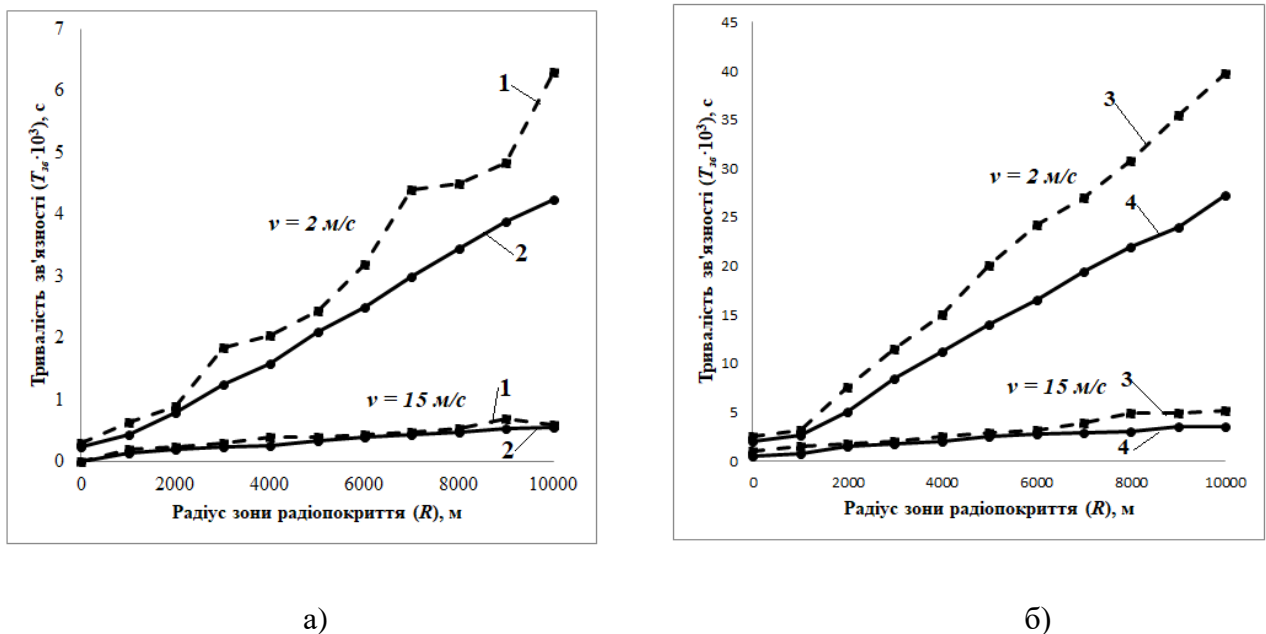


Рисунок 4. Залежність середнього часу досягнення МСВ границі зони покриття від радіуса зони при різних швидкостях і сценаріях переміщення: 1 – «марш» (а), 2 – «випадкові напрямки» (а), 3 – «випадкове блукання в полі» (б), 4 – «випадкове блукання в місті» (б)

Результати моделювання показують, що найбільші значення тривалості зв'язності відповідають сценарію «випадкове блукання в полі», а найменші – «випадкові напрямки» (при фіксованій швидкості переміщення вузлів  $v$  та радіусі зони покриття  $R$ ). Так тривалість зв'язності з'єднання «ТАП-пішохід» на випадок «випадкових напрямків» становитиме в середньому 36 хв, а з'єднання «ТАП-транспортний засіб» - в середньому 5 хв.

Отримані результати використовуються далі при розробці методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання в розділі 4, при визначенні частоти зміни положення ТАП. Таким чином, удосконалена модель оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП дозволяє оцінювати наявність зв'язності між МСВ відповідно до заданої достовірності та прогнозувати її тривалість в умовах швидкого і непередбачуваного руху МСВ.

**Третій розділ** присвячено дослідженню математичних моделей оцінки показників функціонування МБСМ та ТАП: аналітичної моделі розрахунку трафіку в МБСМ та ТАП, аналітичної моделі оцінки пропускної здатності, аналітичної моделі оцінки середньої затримки передачі повідомлень в маршрутах мережі.

*Вихідними даними* для оцінки якості маршрутів передачі повідомлень в МБСМ із ТАП є наступні параметри:  $L=1024$  біт – довжина пакету даних;  $V=11$  Мбіт/с – швидкість передачі даних;  $\Pi = \|l(m_{ab})\|$ ,  $a, b = \overline{1, N}$  – таблиця маршрутизації, де  $l(m_{ab})$  – кількість ретрансляцій в маршруті;  $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$  – матриця тяжіння,  $\gamma_{ab}$  – середня інтенсивність потоку пакетів, що надходить до маршруту  $m_{ab}$  між відправником-одержувачем  $a-b$ ;  $t_s^o = 400$  мс – максимально допустиме значення затримки передачі повідомлень в маршруті  $m_{ab}$  (відповідно до вимог стандарту ITU Y.1541);  $s^o = 5,5$  Мбіт/с – мінімально допустиме значення пропускної здатності маршруту  $m_{ab}$ . Позначимо повний трафік користувача через  $\gamma$ , тобто  $\gamma = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}$ .

При оцінці якості маршрутів в МБСМ введемо наступні обмеження:  $\Omega_2: \{s(m_{ab}) \geq s^o, t_s(m_{ab}) \leq t_s^o, a, b = \overline{1, N}\}$ . Також були зроблені наступні *допущення*:

1) трафік, що передається в МБСМ, - однорідний (без пріоритетів);  
 2) потік пакетів, що обслуговується в вузлах мережі, відповідає пуасонівському розподіленню, тобто  $A(\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau)$ , де  $\lambda$  – інтенсивність пакетів, що надходять на обслуговування.

3) Розподіл часу обслуговування  $B(t)$  може бути довільним і залежить від двох наступних параметрів: інтенсивності обслуговування пакетів  $\mu$  та дисперсії  $D$ .

4) дисципліна обслуговування пакетів в буфері – «перший прийшов – перший обслуговується»;

5) вважається, що виконується умова не зростання черги  $1/\mu < 1/\lambda$ ;

6) спосіб обслуговування пакетів у вузлах МБСМ із ТАП – з очікуванням без обмеження довжини черги.

На основі апарату теорії телекомунікаційних мереж запропоновані прості моделі для розрахунку інтенсивності трафіку в каналах БСМ із МС та ТАП (рис. 5).



пакети передаються на окремій частоті без колізій і пропускна здатність таких радіоканалів близька до одиниці.

За допомогою аналітичних моделей для обраних методів МД і вихідних даних, вказаних вище, отримано графіки залежності пропускної здатності каналів МСВ-МСВ та МСВ-ТАП-МСВ від вхідного навантаження  $G$  (середньої кількості пакетів, які надійшли протягом часу передачі одного пакету  $T = \mu$ ) (рис. 6).

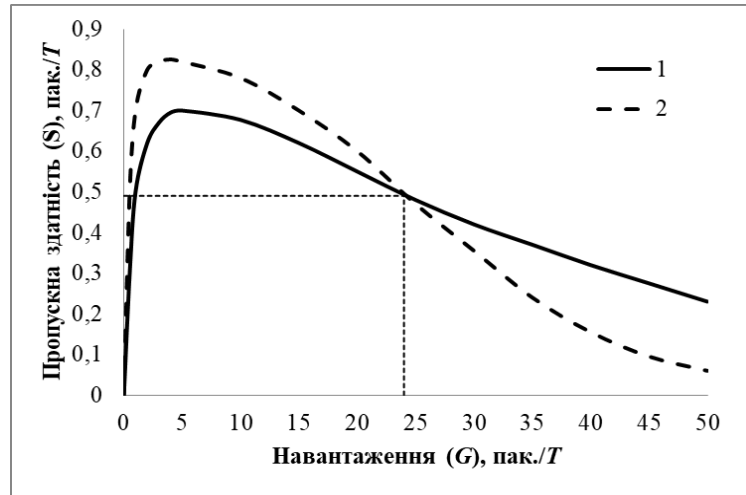


Рис. 6. Залежність пропускної здатності каналів МБСМ від вхідного навантаження: 1 – канал МСВ-МСВ (МДСЗ), 2 – канал МСВ-ТАП-МСВ (АПР,  $n=5$ )

Аналіз графіків на рис. 6 показує, що канали МСВ-ТАП-МСВ за рахунок дуплексної організації мають більшу на 15% пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковій інтенсивності трафіку в діапазоні  $0 \dots 24$ , що визначається мінімально можливим рівнем пропускної здатності ( $s^0 = 0,5$ ). В цьому випадку для підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП доцільніше буде передавати дані через мережу ТАП при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

Затримка передачі в маршруті між відправником  $a$  та отримувачем  $b$  складається із затримок передачі на кожній ділянці маршруту, тобто

$$t_z(m_{ab}) = \sum_{ij} t_{zij}, ij \in m_{ab} \text{ (або } t_z(m_{ab}) = l(m_{ab}) \text{)}.$$

Під середньою затримкою передачі в окремому радіоканалі маршруту будемо розуміти нормований інтервал часу (визначений в одиницях тривалості передачі пакету  $T = \mu$ ) з моменту появи на вході відправника запиту на передачу до завершення безконфліктної передачі пакету даних наступним вузлом маршруту. Затримка на кожній ділянці маршруту у свою чергу визначається наступними складовими:

$$t_{zij} = T_{буф} + T_{МД} + T_{ПП} + T + T_{розп},$$

де  $T_{буф}$  – середній час затримки у черзі буферу;  $T_{МД}$  – середній час організації множинного доступу;  $T_{ПП}$  – середній час затримки повторної передачі;  $T = \mu$  – час передачі пакету;  $T_{розп}$  – максимальний час поширення сигналу в мережі.  $T_{буф}$  у свою чергу визначається типом блоку системи масового обслуговування (СМО) та

його завантаженням  $\lambda/\mu$ ,  $T_{MD}$ ,  $T_{ПП}$  – обраним протоколом МД,  $T$  – відношенням розміру пакету  $L$  до швидкості передачі  $V$ , а  $T_{розп}$  – відношенням максимальної протяжності радіолінії до швидкості поширення сигналу.

Проведено імітаційне моделювання середнього часу перебування пакету в блоці СМО типу М/Г/1 (дані наведені у табл. 1), що підтверджують адекватність обраної аналітичної моделі.

Таблиця 1. Результати моделювання середнього часу перебування пакету в блоці СМО типу М/Г/1

Кількість оброблених пакетів	Інтенсивність надходження пакетів $\lambda$	Час обслуговування $1/\mu$	Коефіцієнт варіації $\nu$	$T_{буф}$ (результати розрахунку)	Результати імітаційного моделювання	
					$T_{буф}$	СКВ $\sigma_T$
10000	$1 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$4,49 \cdot 10^{-6}$	1,258
10000	$1 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$	1,412
10000	$1,099 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,45	0,32	1,505

Згідно аналітичним моделям обраних протоколів МД та способу обслуговування пакетів в вузлах мережі розраховано залежність середньої затримки передачі повідомлень в маршруті від кількості ретрансляцій при однаковому максимально допустимому навантаженні в радіоканалах (рис. 7).

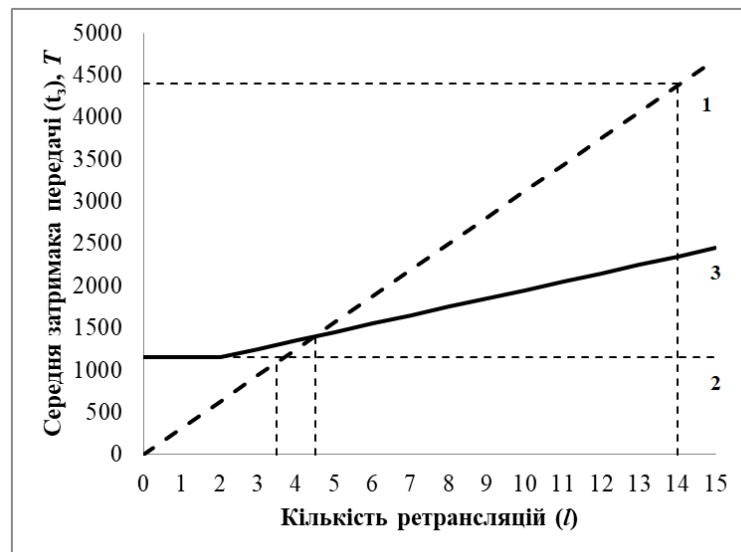


Рисунок 7. Залежність середньої затримки в маршруті від кількості ретрансляцій при різних варіантів передачі: 1 – через мережу МСВ, 2 – через мережу ТАП, 3 – через один ТАП

Аналіз графіків на рис.7 показує, що максимальна кількість ретрансляцій при передачі через мережу МСВ, для заданої величини затримки ( $t_3^0 = 400$  мс), повинна бути не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій доцільніше передавати пакети через мережу ТАП. При цьому всередині стільника пакети вигідніше ретранслювати при кількості ланок більше ніж 3 ланки, а через ТАП – більше ніж 4, що можна використати при пошуку оптимального маршруту між заданою парою відправник-отримувач.

**Четвертий розділ** присвячено розробці методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП, суть якого полягає в систематизації математичних моделей оцінки структурно-функціональної зв'язності МСВ (розглянутих вище) і удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП (розглядається далі) та поєднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення в режимі реального часу близьких до екстремальних значень пропускної здатності МБСМ із ТАП.

Представимо МБСМ із ТАП у вигляді стохастичного ненаправленого зваженого графу  $G(V,E)$ , який складається з множини вершин (МСВ і ТАП)  $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$  та множини ребер

$$E = \{(i,j) | d_{ij} \leq d^0\} \cup \{(i,k) | R_{ik} \leq R^0\} \cup \{(k,l) | D_{kl} \leq D'\} , \quad i,j = \overline{1,N}, \quad k,l = \overline{1,K} ,$$

що визначають матрицю зв'язності мережі  $C = \|c_{ij}\|$ , де  $c_{ij} = \{0,1\}$  – булева змінна. У якості значення ваги ребра може виступати протяжність відповідної радіолінії.

*Пропускна здатність МБСМ із ТАП* визначимо, як сумарну пропускну здатність усіх маршрутів МБСМ із ТАП, тобто  $S(C) = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab})$ ,  $a \neq b$ .

Нехай відомі наступні *вихідні дані*:  $N$ ;  $K$ ;  $r$ ;  $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1,N}$ ;  $d^0(R^0)$ ;  $s^0$ ;  $t_3^0$ ;  $\Pi_i = \|l(m_{ab})\|, a, b = \overline{1,N}$ ;  $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ .

Сформулюємо *задачу управління положенням телекомунікаційних аероплатформ МБСМ із ТАП* наступним чином: знайти в режимі реального часу ( $t \ll T_{38}$ ) координати положення ТАП у просторі  $X_{0k}, k = \overline{1,K}$  (матрицю зв'язності  $C^*$ ), при яких забезпечується масимум пропускної здатності МБСМ із ТАП  $S(C)$ :

$$C^* = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} S(C) = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), a \neq b$$

при виникненні обмежень на ресурси мережі та множину управлінських дій

$$\Omega_1: \{ d_{ij} \leq d^0, R_{ik} \leq R^0, D_{kl} \leq D', T_{38}^{ij} \geq T_{38}^0 \quad \forall ij, ik, kl \in m_{ab}, i, j = \overline{1,N}, k, l = \overline{1,K} \},$$

$$\Omega_2: \{ s(m_{ab}) \geq s^0, t_3(m_{ab}) \leq t_3^0, a, b = \overline{1,N} \},$$

$$\Omega_3: \{ N \leq 200, K \leq 10, 2600 \leq h < 3000 \text{ м}, R \leq 1500 \text{ м} \}.$$

Для вирішення цієї задачі запропоновано *метод підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП* на основі *управління положенням ТАП*, який представлено у вигляді схеми-алгоритму на рис. 8.



Цикл управління топологією (місцеположенням) мережі ТАП включає в себе наступні етапи: збір інформації про стан та параметри функціонування МБСМ із ТАП (блок 1); розрахунок та оцінка параметрів її структури та функціонування (блоки 4,7); знаходження нового місцеположення ТАП у випадку відхилення параметрів функціонування від допустимих значень, що реалізує задану ціль управління (максимум ПЗ) (блоки 6,9,10); виконання отриманого рішення (вивід або переміщення ТАП у задану точку простору) (блок 11) та адаптація до реальних умов функціонування (блок 12). Даний цикл реалізуються послідовно і оперативно для кожної ТАП з врахуванням того, на скільки суттєво змінилася топологія МБСМ із ТАП по відношенню до її попереднього стану (визначається характером та рівнем мобільності МСВ).

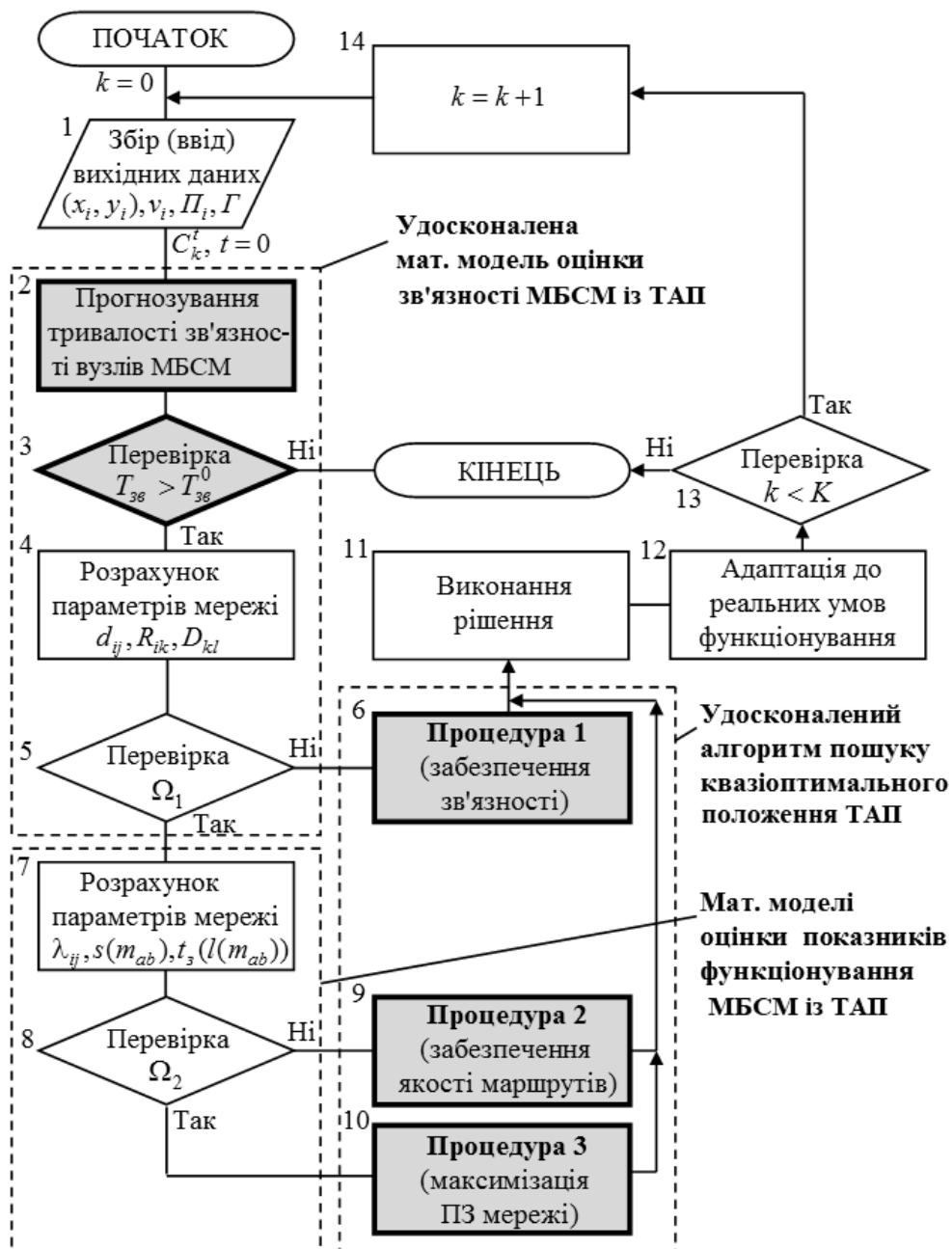


Рисунок 8. Схема-алгоритм управління положенням ТАП, що входять до складу МБСМ із ТАП для підвищення ПЗ мережі (продовження на рис. 9)

Алгоритм знаходження нового положення ТАП у загальному випадку зводиться до перебору усіх можливих варіантів розміщення ТАП. Ця задача відноситься до класу *NP*-повних, тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП запропоновано використовувати попередньо розроблену *сукупність правил* відбору варіантів такої зміни зв'язності МБСМ із ТАП, що підвищує її пропускну здатність, а також зменшує час обчислень. Це дозволяє отримати близькі до оптимальних рішення в режимі реального часу та використовувати алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Схема удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП із використанням сукупності правил показана на рис. 9.

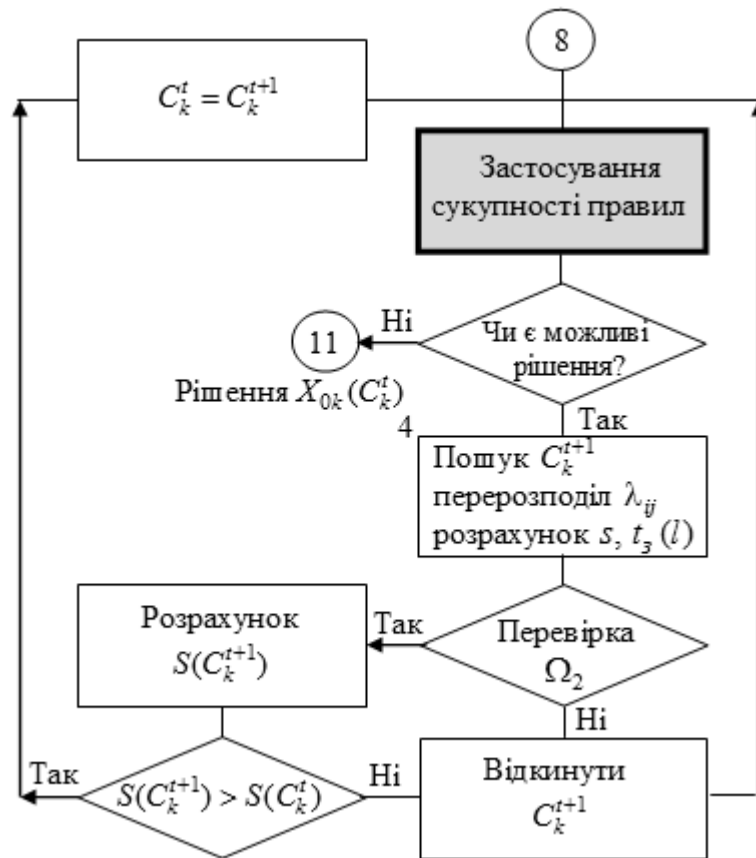


Рисунок 9. Схема удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП із використанням сукупності правил (початок на рис. 8)

Були досліджені існуючі правила та на їх основі розроблені нові модифіковані правила і метаправила та відповідні управлінські дії (процедури пошуку квазіоптимального розміщення ТАП у просторі).

Всі правила класифіковані на три наступні групи: 1) для забезпечення вимог до зв'язності МБСМ із ТАП ( $\Omega_1$ ); 2) для забезпечення вимог до показників функціонування МБСМ із ТАП ( $\Omega_2$ ); 3) для підвищення пропускну здатності МБСМ із ТАП.

Наведемо приклад правил по одному для кожної групи.

Правило №1. Якщо кількість МСВ, що потрапляють в зону покриття ТАП, переважає задану (визначається створюваним ними навантаженням), тоді зменшити потужність ТАП (радіус зони радіо покриття  $R$ ) для покриття оптимальної кількості  $N_k \leq N_k^0$  МСВ.

Мета-правило №1. Якщо існує декілька способів розміщення ТАП, що поєднує однакову кількість вузлів (компонент зв'язності), то обрати той, що має кількість «сусідів-ТАП» не більше заданої  $M_k \leq 5,1774 \log K$ .

Правило № 2. Якщо значення середньої затримки передачі (кількість ретрансляцій) в деякому маршруті (маршрутах) більше необхідної, тоді ТАП необхідно розмістити так, щоб зменшити значення середньої затримки передачі (кількість ретрансляцій) в маршруті (маршрутах).

Мета-правило №2. Якщо існує декілька варіантів розміщення ТАП, при яких однаково зменшується затримка в маршруті (маршрутах), то слід обрати той, що дозволяє максимізувати пропускну здатність маршруту (маршрутів).

Правило №3. Якщо необхідно підвищити пропускну здатність МБСМ із ТАП, то ТАП необхідно розмістити так, щоб покрити максимальну кількість перевантажених МСВ МБСМ із ТАП.

Моделювання функціонування МБСМ із ТАП здійснювалося на базі комп'ютерних середовищ Microsoft Excel і Maple. Застосовувалися наступні вихідні дані:  $N=165$  – кількість МСВ;  $K=5$  – кількість ТАП;  $r = 10000 \times 10000 \text{ м}^2$  – розмір району розміщення МСВ;  $d^0 = 600 \text{ м}$  – максимальна дальність зв'язку МСВ-МСВ;  $R' = 1500 \text{ м}$  – максимальна дальність зв'язку МСВ-ТАП; алгоритм пошуку найкоротших шляхів – Дейкстри;  $L=1024$  біт – довжина пакету;  $V=11 \text{ Мбіт/с}$  – швидкість передачі;  $v_i = 15 \text{ м/с}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – середня швидкість переміщення МСВ. Інші вихідні дані повторюють дані з попередніх розділів.

Для оцінки ефективності запропонованого методу було розглянуто наступні стратегії управління (СУ) положенням ТАП:

1. Базова стратегія управління (СУ1) з покриттям максимальної кількості МСВ.
2. Стратегія управління з використанням методу повного перебору (СУ2).
3. Стратегія управління на основі запропонованих правил (СУ3) з покриттям максимальної кількості перевантажених вузлів.

Оцінка ефективності запропонованого методу проводилася в наступній послідовності:

1) Задання топології МБСМ із ТАП випадковим чином та розміщення ТАП відповідно СУ1, СУ2 та СУ3 (рис. 10).

2) Розрахунок пропускну здатності  $S(C)$  МБСМ із ТАП для кожної СУ. Визначення виграшу стратегій СУ2 і СУ3 по відношенню до СУ1 та достовірності результатів кожної СУ відносно методу повного перебору (рис.11,12).

3) Розрахунок часу пошуку рішення для методу повного перебору (СУ2) і запропонованого методу (СУ3) та порівняння значень із тривалістю зв'язності МСВ.

Аналіз графіків залежності пропускну здатності МБСМ із ТАП від загального навантаження при різних стратегіях управління показує, що в діапазоні трафіку від 600 до 1500 пакетів стратегія управління положенням ТАП (СУ3) значно

переважають базову стратегію (СУ1) впродовж нормованого часу передачі пакету  $T$ . В інших діапазонах трафіку усі СУ майже однаково неефективні.

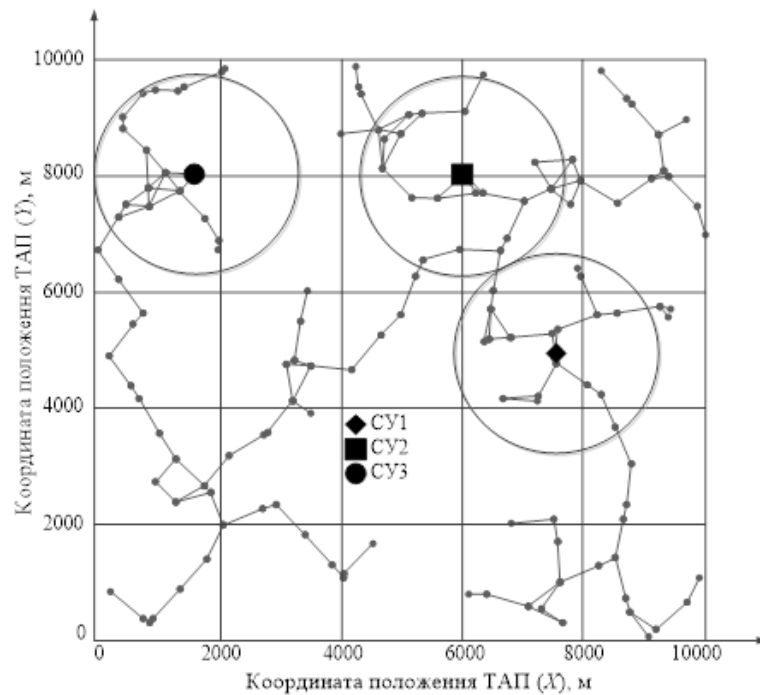


Рисунок 10. Початкова топологія МБСМ із розміщенням одного ТАП для СУ1, СУ2 і СУ3

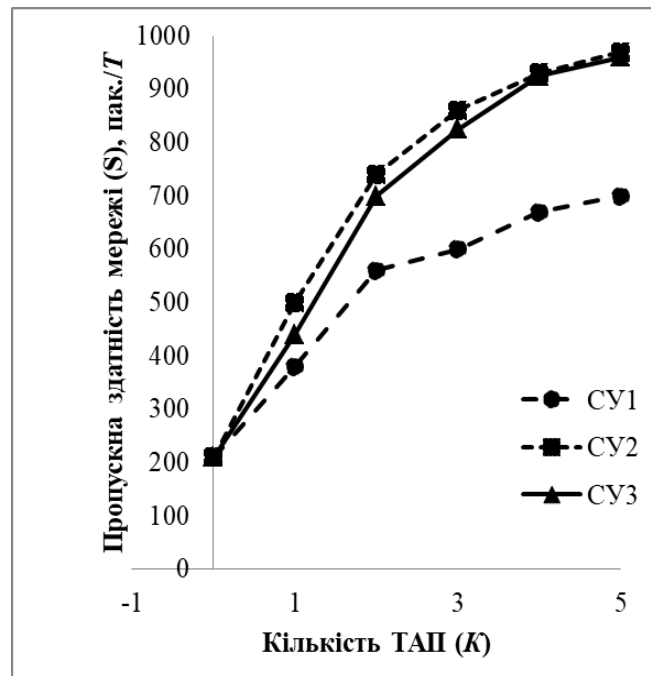


Рисунок 11. Залежність ПЗ мережі для різних систем управління положенням ТАП від кількості виведених ТАП

Оцінка ефективності запропонованого методу показує наступне:

1) Виграш запропонованого методу (СУ3) відносно базової стратегії (СУ1) при генерації 100 початкових випадкових топологій становить в середньому 10-12%.

2) Відхилення значення пропускної здатності в запропонованому методі (СУ3) від пропускної здатності в методі повного перебору (СУ2) становить в середньому 5-7%.

3) При середній тривалості зв'язності між МСВ 350с час отримання рішення для запропонованого методу (СУ3) становить в середньому 24с, що дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу на відміну від методу повного перебору (СУ2), для якого час отримання рішення становить десятки хвилин.

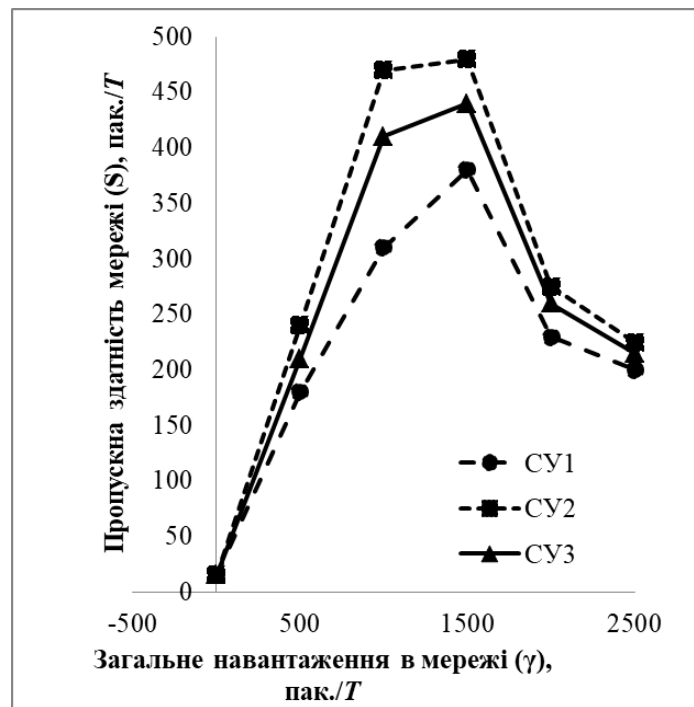


Рисунок 12. Залежність ПЗ мережі для різних систем управління положенням ТАП від загального навантаження

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача - розробка методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ. Головні наукові і практичні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності мобільних сенсорних вузлів мобільної безпроводової сенсорної мережі із телекомунікаційним аероплатформами. Суть удосконалення математичної моделі полягає в тому, що вперше були об'єднані сукупність аналітичних моделей оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах і сукупність аналітичних моделей прогнозування переміщення мобільних сенсорних вузлів. Показано, що при заданих вимогах до роботи протоколу МД максимальна дальність зв'язності становить близько 600м для каналу МСВ-МСВ та близько 3000 м для каналу МСВ-ТАП. На основі розроблених математичних моделей переміщення МСВ було досліджено тривалість безпосередньої зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Тривалість з'єднання

ТАП – МСВ-пішохід становитиме в найгіршому випадку в середньому 36 хвилин, а з'єднання ТАП – МСВ-транспортний засіб в середньому 5 хвилин, що дозволяє на практиці прогнозувати час перебування МСВ в зоні радіопокриття ТАП та визначати частоту зміни положення ТАП у просторі.

2. Були досліджені математичні моделі оцінки функціональних показників мобільної безпроводової сенсорної мережі із телекомунікаційним аероплатформами, що базуються на детальному розрахунку трафіку в МБСМ із ТАП та вточнених аналітичних співвідношеннях для оцінки пропускної здатності і середньої затримки передачі в МБСМ із ТАП. Показано, що канали зв'язку із ТАП за рахунок дуплексної організації мають на 15% більшу пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковому навантаженні. Для зменшення затримки передачі в маршрутах також доцільно передавати інформацію через мережу ТАП. При цьому всередині стільника доцільно ретранслювати пакети при кількості ланок в маршруті більше ніж 3, а через ТАП – більше ніж 4. Це можна бути використане при пошуку найкоротшого маршруту між заданою парою відправник-отримувач.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП.

Суть удосконалення алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП полягає в тому, що при його застосуванні вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення ТАП в просторі завдяки використанню попередньо розробленої сукупності правил відбору варіантів зміни зв'язності МБСМ із ТАП, що підвищують пропускну здатність мережі і зменшують час обчислень. Результати моделювання показують, що час отримання рішення із застосуванням сукупності правил становить в середньому 24с, що при середній тривалості зв'язності між МСВ 350 с, дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу на відміну від методу повного перебору, для якого час отримання рішення становить десятки хвилин. Відхилення рішень квазіоптимальних варіантів розміщення ТАП від оптимальних, отриманих за допомогою методу повного перебору, не перевищує 5-7%.

4. Розроблено метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП. Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше були об'єднані в єдину обчислювальну процедуру математичні моделі оцінки зв'язності МСВ, математичні моделі оцінки якості обслуговування МСВ і удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП. Це створює можливість досягати близьких до екстремальних значень пропускної здатності МБСМ із ТАП в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ. Виграш від застосування запропонованого методу становить в середньому 10-12% відносно базової стратегії управління положенням ТАП.

Наукові результати, отримані в дисертації можуть бути використані при розробці сучасних систем управління МБСМ із застосуванням ТАП та підвищенні ефективності їх функціонування.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Результати дослідження опубліковано у наступних публікаціях:

1. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, П.І. Кірчу, О.М. Тачиніна, В.І. Новіков. – К.: НАУ, 2016. – С.332.
2. Tachinina, O. Mathematical Modeling of Motion of Iron Bird Target Node of Security Data Management System Sensors / O. Tachinina, O. Lysenko, I. Alekseeva, V. Novikov // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol-2711, pp. 482-491 (стаття у закордонному періодичному науковому виданні CEUR Conference Proceedings іншої держави (Німеччина), яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, що індексується у наукометричній базі **Scopus**).
3. Новіков В. І. Математичні моделі, методи і алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 3 2020 Частина 1. – С. 54 – 64.
4. Новіков В. І. Методика синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, О.М. Тачиніна, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 4 2020. – С. 31 – 37.
5. Лисенко О.І. Процедура синтезу топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів [Текст] / О.І. Лисенко, В.І. Новіков, В.М. Петрова, О.Г. Гуйда / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2018. Том 29 (68) № 6 2018 Частина 1. – С. 69 – 72.
6. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами [Текст] / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи, 2017, № 2. С. 15-23.
7. Лисенко О. І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища [Текст] / О. І. Лисенко, К. С. Козелкова, В. І. Новіков, Т. О. Прищепа, А. В. Романюк // Системи обробки інформації. - 2015. - Вип. 10. - С. 222-225.
8. Новіков В. И. Метод адаптивного управления маршрутизацией в условиях нестабильности связей между узлами беспроводной сенсорной сети. Научный вестник Академии муниципального управления. Сборник научных работ. Серия «Техника». – 2015. – Вип.10. – С. 137-144.
9. Новіков В. І. Метрики вартості з'єднання та прогресу для вирішення завдань маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В. І. Новіков // Научный

вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 2. - С. 96-108.

10. Новіков В. І. Модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах великомасштабних завмирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів / В. І. Новіков // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 1. - С. 143-152.

11. Брагін А. С. Метод підвищення точності позиціонування мобільних абонентів / А. С. Брагін, В. І. Новіков, Т. А. Прищепа, Р. С. Понедільченко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2012. - Вип. 5. - С. 12-20.

12. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Система стабілізації безпілотного літального апарата на траєкторіях баражування; № 112657 дата 10.10.2016

13. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 110683 дата 25.01.2016

14. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб зниження енерговитрат польоту безпілотного літального апарата; № 109483 дата 25.08.2015

15. Патент України на корисну модель; Назва охоронного документу «Спосіб визначення координат сенсорів бездротової сенсорної мережі» № 130356 дата 10.12.2018

16. Патент України на корисну модель; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 99483 дата 10.06.2015

17. Свідоцтво авторського права; Назва охоронного документу - Метод зниження енерговитрат польоту телекомунікаційної аероплатформи на базі безпілотного літального апарату; Науковий твір; № 3042 дата 22.07.2016

18. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. С. 72– 75 (видання України, включене до міжнародної наукометричної бази **Scopus**)

19. Kashuba S. Hybrid Localization Method for Sensor Networks with Low Nodes Density / S. Kashuba, B. Trach, V. Novikov, T. Pryshchepa // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. С. 76– 79 (видання України, включене до міжнародної наукометричної бази **Scopus**)

20. Kashuba, S. V. Optimization of UAV Path for Wireless Sensor Network Data Gathering / S. V. Kashuba, V. I. Novikov, O. I. Lysenko, and I. V. Alekseeva // 2015 IEEE 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Proceedings. – 2015. - С. 280 – 283 (видання України, включене до міжнародної наукометричної бази **Scopus**)

21. Lysenko A.I. Analysis of options for construction of the satellite sensor systems / A.I. Lysenko, S.V. Kashuba, T.A. Prishchepa, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, S.V. Karmazyn // Usporiadatel' medzynarodnej vedeckej konferencie: Akademia ozbrojených síl



generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 346-351.

22. Lysenko A.I. Improving efficiency wireless sensor networks with satellite information transmission channels / A.I. Lysenko, S.V. Kashuba, T.A. Prishcha, V.I. Novikov, S.N. Chumachenko, O.P. Kutovy // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany*. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 352-357.

23. Lysenko A.I. Investigation of possible application of the protocol bfd to improving the reliability of wireless sensor networks / A.I. Lysenko, B.V. Trach V.I., T.A. Prishcha, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, A.N. Teslenko // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika, Katedra bezpečnosti a obrany*. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 358-363.

24. Lysenko O. Method of sensors location in the area of emergency based on compound dynamic system technology / O. Lysenko, V. Novikov, T. Prishcha, H. Tachinina, I. Uriadnikova // *International Scientific Conference COMPLEX SYSTEMS SECURITY MANAGEMENT 2015* (23. - 27. februara 2015), Liptovský Mikuláš, Slovakia. pp. 226-231.

25. Новіков В.І. Підхід до побудови системи моніторингу цілей на основі застосування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // *Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції*. Київ: ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катеринослав: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсант-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ; Білорусь: БДАЗ; Кропивницький: ЛА НАУ, 2019. – С.199.

26. Лисенко О. І. Метод підвищення ефективності безпроводових сенсорних мереж екологічного моніторингу, побудованих на радіогідроакустичних буях / О.І.Лисенко, В.І. Новіков, В.М.Петрова // *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація. Матеріали науково-практичного семінару*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2019. – С.95 - 97.

27. Новіков В. І. Алгоритм мінімізації витрат енергоресурсу безпроводової сенсорної мережі / В. І. Новіков, О. І. Лисенко, С. М. Чумаченко, І. М. Давидов // *Матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій»*, 7–8 лютого 2019 р. (Краків, Польща). – К. : НУХТ, 2019. – С.10 - 14.

28. Новіков В.І. Аналітична модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах замирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів/ В.І. Новіков // *XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.34-37.

29. Новіков В.І. Розвиток енергозберігаючого методу моніторингу цілей у зонах спостереження безпроводових сенсорних мереж/ В.І. Новіков, М.К. Спаравало, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва // *XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.301-303.

30. Лисенко О.І. Енергозберігаюча топологія для безпроводової сенсорної мережі моніторингу цілей / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // *Проблеми інформатизації:*

Матеріали дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Київ : ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсант-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ; Білорусь: БДАЗ, 2018. – С.123-124.

31. Новіков В.І. Метрика вартості з'єднання для маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В.І. Новіков // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2019: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.67-70.

32. Романюк В.А. Система управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексеева, А.В. Романюк, В.І. Новіков // XI Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С.28-32.

33. Новіков В.І. Метод адаптивного управління маршрутизацією в умовах нестабільності зв'язей между узлами беспроводной сенсорной сети / В.І. Новіков, А.І. Лисенко // X Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С.447-449.

34. Новіков В.І. Розвиток методу підвищення часу функціонування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // IX Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2015. – С.354-356.

35. Лисенко О.І. Актуальні наукові задачі розвитку безпроводових сенсорних мереж / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // VII Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2013: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2013. – С.227-229.

## АНОТАЦІЯ

Новіков В.І. Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

У роботі запропоновано новий метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) на основі використання телекомунікаційних аероплатформ (ТАП). Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше були об'єднані в єдину обчислювальну процедуру математичні моделі оцінки зв'язності МСВ, математичні моделі оцінки якості обслуговування МСВ і удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП. Суть удосконалення алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП полягає в тому, що при його застосуванні вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення ТАП в просторі завдяки використанню попередньо розробленої сукупності правил відбору варіантів зміни зв'язності

МБСМ із ТАП, що підвищують пропускну здатність мережі і зменшують час обчислень.

**Ключові слова:** пропускна пропускна здатність, зв'язність, мобільна безпроводова сенсорна мережа, телекомунікаційна аероплатформа, мобільний сенсорний вузол, управління, місцеположення.

## АННОТАЦИЯ

Новиков В.И. Метод повышения пропускной способности мобильных беспроводных сенсорных сетей на основе использования телекоммуникационных аероплатформ. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

В работе предложен новый метод повышения пропускной способности мобильных беспроводных сенсорных сетей (МБСС) на основе использования телекоммуникационных аероплатформ (ТАП). Отличие разработанного метода от известных заключается в том, что впервые были объединены в единую вычислительную процедуру математические модели оценки связности МСУ, математические модели оценки качества обслуживания МСУ и усовершенствованный алгоритм поиска квазиоптимального положения ТАП. Суть усовершенствования алгоритма поиска квазиоптимального положения ТАП заключается в том, что при его применении удалось избежать полного перебора вариантов размещения ТАП в пространстве благодаря использованию предварительно разработанной совокупности правил отбора вариантов изменения связности МБСС с ТАП, которые повышают пропускную способность сети и уменьшают время вычислений.

**Ключевые слова:** пропускная способность, связность, мобильная беспроводная сенсорная сеть, телекоммуникационная аероплатформа, мобильный сенсорный узел, управление, местоположение.

## SUMMARY

Novikov V.I. A method of increasing the throughput of mobile wireless sensor networks based on the use of telecommunication aerial platforms. - As a manuscript.

Dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.12.02 - telecommunication systems and networks. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

Natural and man-made emergencies, military conflicts that are increasingly occurring in our world, lead to partial or complete failure of terrestrial infrastructure, including telecommunications infrastructure (radio relay and satellite stations, cellular base stations, cable lines and etc.). Operational communication of rescue teams and other services in such situations is possible by deploying mobile wireless sensor networks using telecommunication air platforms.

The dissertation solves an important scientific and technical problem - the development of a method to increase the throughput of mobile wireless sensor networks with telecommunications aircraft in conditions of rapid and unpredictable movement of mobile sensor nodes. The main scientific and practical results of the dissertation are as follows.

The mathematical model for estimating the connectivity of mobile sensor nodes of mobile wireless sensor networks with telecommunication air platforms has been improved. The essence of improving the connectivity assessment model, which determines its novelty, is that for the first time it was proposed to combine analytical models for assessing the reliability of messages in radio channels with analytical models for predicting the movement of mobile sensor nodes. Based on the developed mathematical models of mobile sensor node movement, the duration of direct connectivity of mobile wireless sensor network nodes with telecommunication air platforms was investigated. Thus, the duration of the connection "telecommunication aircraft - mobile sensor unit pedestrian" will be in the worst case an average of 36 minutes, and the connection "telecommunications aircraft platform - mobile sensor unit vehicle" an average of 5 minutes, which allows in practice to predict the time of mobile sensor nodes in the area of radio coverage of telecommunications air platforms and determine the frequency of changes in the space of their position.

Mathematical models for estimating the functional indicators of mobile wireless sensor networks with telecommunication air platforms, which are based on a detailed calculation of traffic and refined analytical ratios to estimate the average message delay and network bandwidth, have been studied. It is shown that the communication channels with telecommunication air platforms due to duplex organization have 15% more bandwidth than the channels of the mobile sensor node - mobile sensor node at the same load. To reduce transmission delays in routes, it is also advisable to transmit information through a network of telecommunications platforms.

The algorithm for finding the quasi-optimal position of telecommunication air platforms has been improved. The essence of the algorithm improvement is that to find the quasi-optimal position of telecommunication air platforms it was first proposed to use a pre-developed set of rules for selecting options to change the connectivity of the network, which increases its bandwidth and significantly reduces computing time compared to full scheduling. telecommunication air platforms. The simulation results show that the time to obtain a solution using a set of rules averages 24s, which with an average duration of connectivity between mobile sensor nodes 350 c, allows you to control the position of telecommunications aircraft in real time in contrast to the full search method, for which the time to obtain a decision is tens of minutes. Deviation of decisions of quasi-optimal options of placement of telecommunication air platforms from the optimum, received by means of a method of full search, does not exceed 5-7%.

A method for increasing the throughput of mobile wireless sensor networks based on the use of telecommunication air platforms has been developed. The difference between the developed method and the known methods is that for the first time a special computational structure based on mathematical models for assessing the structural connectivity of mobile sensor nodes, mathematical models for assessing the quality of service of mobile sensor nodes and an improved algorithm for finding quasi-optimal

position of telecommunications and airplanes combining them into a single computational procedure to achieve real-time throughput values of mobile wireless sensor networks with telecommunications air platforms close to extreme. The gain from the application of the proposed method is on average 10-12% relative to the basic strategy of position management of telecommunications air platforms.

The practical value of the scientific results obtained in the dissertation is that the developed method, mathematical models and algorithms allow to quantify the impact of mobility of nodes of mobile wireless sensor networks with telecommunications air platforms on the duration of connectivity between mobile sensor nodes; to determine the rational position of telecommunication air platforms in order to achieve the highest possible values of the capacity of mobile wireless sensor networks with telecommunication air platforms; to control the position of telecommunication air platforms in real time; to increase the efficiency of the software of network management systems of telecommunication air platforms.

Key words: throughput, connectivity, mobile wireless sensor network, telecommunication air platform, mobile sensor node, control, location.